

学校编码: 10384

密级_____

学号: 22620101151407

廈門大學

硕士学位论文

南海 POC 遥感反演算法及时空分布特征

Remote Sensing Retrieval Algorithms and Spatial-temporal

Characteristics of POC in the South China Sea

张 鹏

指导教师姓名: 王海黎 教授级高级工程师

专 业 名 称: 环 境 科 学

论文提交日期: 2015 年 5 月

论文答辩时间: 2015 年 5 月

2015年5月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 选题背景及研究意义.....	1
1.2 研究现状.....	2
1.3 研究目标及内容.....	4
1.4 论文框架.....	5
第二章 数据与方法.....	6
2.1 研究区域背景.....	6
2.2 数据来源.....	6
2.3 海水固有光学特性数据获取及处理方法.....	8
2.3.1 吸收系数.....	8
2.3.2 体积散射函数与后向散射系数.....	10
2.3.3 HS6 数据处理方法.....	14
2.4 海水表观光学特性数据及处理方法.....	15
2.5 生物化学数据及遥感数据处理方法.....	18
2.5.1 叶绿素 a 浓度.....	18
2.5.2 颗粒有机碳浓度.....	18
2.5.3 遥感数据.....	19
第三章 南海 POC 遥感反演算法.....	21
3.1 POC 空间分布及遥感光谱概况.....	21
3.2 单波段算法.....	24
3.3 蓝绿比值方法.....	26
3.4 两步算法.....	29
3.5 不同算法比较.....	34
第四章 南海 POC 时空分布特征.....	36

4.1 POC 季节变化及分布特征	36
4.1.1 南海北部陆架区	41
4.1.2 珠江口区域	46
4.1.3 吕宋岛西北区域	50
4.1.4 中央海盆区域	55
4.2 POC 季节变化与环境因子关系总结	59
4.3 南海 POC 年际变化特征	60
第五章 总结和展望	64
5.1 论文小结	64
5.2 未来工作展望	65
参考文献	66
致谢	74

Contents

Abstract(in Chinese).....	I
Abstract(in English).....	III
Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Background and significance of the researchs.....	1
1.2 Overview of the researchs.....	2
1.3 Target and contents of the researchs	4
1.4 Structure of the writing	5
Chapter 2 Data and Methods	6
2.1 Background of studied area	6
2.2 Data source.....	6
2.3 IOPs of seawater and data processing methods	8
2.3.1 Absorption coefficient.....	8
2.3.2 Volume scattering function and back scattering coefficient	10
2.3.3 HS6 data processing methods.....	14
2.4 AOPs of seawater and data processing methods.....	15
2.5 The biochemistry data and remote sensing data processing methods.....	18
2.5.1 Concentration of chl-a	18
2.5.2 Concentration of POC	18
2.5.3 Remote sensing data	19
Chapter 3 The remote sensing algorithm for POC in South China Sea.....	21
3.1 The distribution of POC and remote sensing spectra.....	21
3.2 The single band algorithm	24
3.3 The blue-to-green band ratio algorithm	26
3.4 The two step algorithm	29
3.5 The comparison of different algorithms	34

Chapter 4	The spatial-temporal characteristics of POC in South China Sea.....	36
4.1	The distribution of monthly average POC concentration and seasonal characteristics	36
4.1.1	The continental shelf area in Northern South China Sea.....	41
4.1.2	The estuary area of Pearl River.....	46
4.1.3	Northwestern Luzon area.....	50
4.1.4	The central basin sea area.....	55
4.2	Summary of relationships between POC seasonal changes and environmental factors.....	59
4.3	The inter-annual variation of POC.....	60
Chapter 5	Conclusion and prospective.....	64
5.1	Conclusion	64
5.2	Prospective.....	65
References.....		66
Acknowledgement.....		74

摘 要

颗粒有机碳(Particulate Organic Carbon, POC)是海洋生物地球化学过程的重要组成部分,随着光学技术和遥感手段的进步,在不同时空尺度下监测 POC 取得很大突破。本文以 2011 年国家自然科学基金委南海共享航次现场光学数据为基础,探索适用于南海 POC 反演的海色卫星遥感算法,将算法应用到卫 SeaWiifs 遥感反射比 $R_{rs}(\lambda)$ 数据,得到南海月平均 POC,并分析其在季节和年际时间尺度上的时空变化特征。

首先,依据现场观测遥感反射比 $R_{rs}(\lambda)$ 和 POC,用多种方法来估算南海表层 POC 浓度。本文比较了单波段经验算法,双波段蓝绿遥感比值法以及两步算法(先由 $R_{rs}(\lambda)$ 计算后向散射系数 b_{bp} ,再建立 POC 同 b_{bp} 的关系)。通过比较发现,POC 和 $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$ 经验关系算法相关性最高,均方根误差最小,本文选择该算法计算南海 POC。

接着,选择南海北部陆架区、珠江口、吕宋岛西北部、中央海盆 4 个典型海区,分析其 POC 季节变化特征和主要影响因素。北部陆架区为典型的夏季上升流区域,该区域水深很浅,在较强的冬季季风影响下垂直混合剧烈,将底层的颗粒物和营养盐带到上层,因此 POC 含量很高,在夏季盛行西南季风,导致沿岸上升流,同样会导致 POC 增加,但是幅度很弱。珠江口区域受淡水河流输入影响显著,和陆架区相似,冬季季风引起的混合使 POC 出现高值,夏季虽然有西南季风作用形成的上升流,但更主要是受高营养盐径流输入影响,亦出现和冬季相似的高值。在吕宋岛西侧区域,冬季会出现浮游植物藻华,冬季冷涡导致温跃层较浅,在这种背景下风引起的抽吸效率会很高,促进营养盐和颗粒物向上输运,在夏季暖涡温跃层很厚抑制了底层营养盐和颗粒物向上输送,减弱了风速引起的抽吸效率。在南海中央海盆处,该区域受季风、黑潮入侵等影响较小,可以看作是南海的背景场,该区域海平面变化同风场相关性很弱,海表面的变化可能不是由局地风场引起的,冷、暖涡对 POC 有促进或减弱作用,风场会改变 POC 含量,同样的风速在暖涡区域引起的 POC 变化要小于冷涡区域,由于该区域海平面和风季节变化不像其他区域那么大,因此 POC 的变化也不是很大。

最后,选择中央海盆区域分析南海 POC 年际尺度上的时间变化特征。中央海盆 POC 为南海最低区域,其变化受季风、河口陆源输入、上升流、黑潮入侵

等物理过程影响较小,其 POC 年际变化主要归因于西太平洋边缘海的气候震荡,本文分析了 POC 异常、风速异常、海平面异常同 MEI(多维 ENSO 指数)的关系,发现 POC 在 El-Nino 和 La-Nina 下没有明显的差别,都随 ENSO 程度增大减小,并分析了其可能的原因是温跃层和风场的共同作用。

关键词: 南海; 颗粒有机碳; 反演算法; 季节变化; 年际变化

Abstract

Particulate Organic Carbon (POC) is an important component of biogeochemistry. With the development of optical technology and the remote sensing technology, the measurements of POC in different spatial-temporal scales had made breakthrough progresses. South China Sea (SCS) is a marginal sea of West Pacific Ocean; however, there are few POC remote sensing researches here. This paper tried to explore the POC remote sensing algorithms suitable for SCS based on the in-situ optical data in 2011 funded by Natural Science Foundation of China (NSFC). Then this paper applied this algorithm to SeaWiifs Remote Sensing Reflectance data to get monthly averaged POC data, and then analyzed the temporal-spatial variations in inner- and inter- annual scales.

First, this Paper estimated the SCS surface POC concentration through many methods based on the in-situ remote sensing reflectance $R_{rs}(\lambda)$ and POC. Here this paper compared single band empirical method, blue-green band ratio empirical method, and two-step method (first obtain optical backward scattering b_{bp} , then establish the relationship between b_{bp} and POC). We found that the performance of $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$ empirical method is best among all the above methods, with the highest correlation and lowest root mean square error (RMSE), and chose this method to calculate POC in SCS.

Second, we chose the Northern SCS Shelf area, Pearl River Estuary, Northwest of Luzon Island, and Central Basin as typical areas to analyze the POC inner-annual variations and the main influence factors. Northern SCS Shelf area, locating at upwelling region in summer, was relatively shallow. In winter, the strong monsoon induced vertical mixing and brought bottom particulate matter and nutrient to the upper water to enhance the phytoplankton, so POC was the highest in the year. In summer, the southwest monsoon lead to the coastal upwelling due to Ekman transport, POC was relatively high but rather lower than in winter. Pearl River estuary was significantly influenced by freshwater river input. In winter, same to the Northern Shelf Area POC was very large also owing to the strong vertical mixing. In summer,

POC was a second high peak, and sometimes it was even equal to the value in winter. The reasons included not only the summer upwelling but also the high nutrient runoff input. Northwest of Luzon Island was a typical winter bloom area, while at most ocean the bloom often occurred in spring. In winter, thermocline was shallower and at this occasion the Ekman Pumping is more efficiently so more nutrient was taken into the upper layer to prompt the phytoplankton. In summer, this surface height of this area was often very high, and many warm eddies would exist that downwelling occurred. The thick thermocline also inhibited the upwelling efficiency. So the phytoplankton and then POC was very low due to lack of nutrient in summer. Central Basin area was barely affected by the monsoon, kuroshio intrusion, and can be seen as the steady background of the whole SCS. The relation between the surface height and sea surface wind was very weak, and the warm or cold eddies may be not induced by local wind. Wind could enhance POC but the increase efficiency were different at different seasons that the same wind can lead to more POC in winter than in summer.

Here this paper selected the data of central basin area to analyze the inter-annual variation of POC. POC of this area was the minimum in SCS, and it was nearly not affected by monsoon, river runoff, upwelling, and kuroshio intrusion physical dynamics, and the inter-annual variation was mainly determined by the Western Pacific climate oscillation. We analyzed POC anomaly, Wind anomaly, Sea Surface Level anomaly under different ENSO patterns, and found that the responses to MEI (multivariate ENSO index) were asymmetric. The relations between the above parameters and MEI were much higher in negative MEI (La-Nina) conditions than in positive MEI (El-Nino) conditions.

Keywords: South China Sea; POC; retrieval algorithms; Inner-annual variation; Inter-annual variation

第一章 绪论

1.1 选题背景及研究意义

海洋在地球碳体系中的作用举足轻重,研究表明人类活动生成的碳近一半左右进入了海洋[Sabine et al., 2004]。对海洋碳库中各组分进行有效监测是了解海洋碳循环的首要前提。海洋中的 POC 由自养生物、异养生物和生源有机碎屑物质构成,虽只占海洋总碳库的一小部分,但其重要作用却不容忽视。POC 的沉降是海洋生物泵(biological pump)的主要过程之一,海洋初级生产者固定的有机碳通过这一机制沉积到洋底,成为大气二氧化碳一个长期的汇。POC 的生成与浮游植物的光合作用有关,在海洋真光层内非常活跃,但是人们对 POC 在较大时空尺度上的分布和动态变化机理的了解依然有限。因此,亟需发展可靠的现场光学测量以及卫星遥感反演技术以实现对各种海洋环境中不同时空尺度下 POC 分布变化的有效监测。

海洋学研究传统上用叶绿素 a(chlorophyll a, chl-a)来表征浮游植物生物量,这一方面是因为 chl-a 的现场测定相对容易,另一方面因为与 chl-a 有关的光学遥感理论基础较为成熟,相应技术也较易实现,现场观测数据比较多。但是,要探究海洋生物地球化学过程及其在气候变迁中的作用,碳是最需要了解的最直接的核心要素,而不是 chl-a。初级生产的估算和生物地球化学过程研究往往需要用到浮游植物的碳生物量。在借助遥感手段建立浮游植物生长速率和基于碳的净初级生产的估算方法时,首先就非常有必要了解整个 POC 储库和其中浮游植物碳部分的动态变化规律[Behrenfeld et al.,2005]。

尽管在多数情况下浮游植物是海洋 POC 的主要贡献者,且总体上 POC 浓度与浮游植物碳有很好的相关性,但由于浮游植物细胞内 chl-a 的含量随营养盐和光照条件变动[Geider, 1987],其 POC:chl-a 比值亦随之变化。在不同的海区或者不同的生长期,浮游植物碳所占 POC 的比例一般会在 20-50% 间存在较大变动[Epply et al., 1992; DuRand et al., 2001; Gundersen et al., 2001]。因此,简单地将 chl-a 通过一固定乘比换算为碳生物量,会使得对初级生产速率和海洋植物碳储量的估算不够准确,进而影响对其在全球碳收支贡献的测算[Faugeras et al.,

2004]。而浮游植物的碳生物量在海洋中的周转时间相对较短(只有 1-2 周), 船基观测的密度对于这样的时间尺度太过稀疏, 因此用卫星遥感的手段监测 POC 的变化将有助于对海洋生物泵过程的描绘和理解。

对我国近海开展的 POC 时空分布和水平、垂直通量研究几乎覆盖了所有海区, 包括: 黄东海[刘文臣、王荣, 1997; 黄自强、傅天保, 1997; 金海燕等, 2006]、南海[陈建芳, 1999; Cai et al., 2008]以及主要河口港湾等[陈敏、黄奕普等, 2002; 林晶等, 2007], 如能用卫星遥测 POC, 将极大地促进我国邻近海域的有机碳循环研究。但是当前针对该区域的 POC 海色(ocean color)遥感研究较少, [白雁, 2007]根据现场观测数据, 建立了黄海、东海海区 POC 的遥感反演算法, [Wang 等, 2011]分析了珠江口 POC 同海洋光学性质的关系, 建立了该区域遥感反演 POC 的经验算法。美国 NASA 刚刚将[Stramski et al., 2008]算法反演的 POC 作为新增添的轨海色卫星的标准遥感产品。但是由于其数据源主要是低纬度南太平洋区一个断面观测, 对这一算法在其他海区的真实性检验, 尤其是诸如南海这样的低纬度区域的边缘海, 尚未见报道。南海地理环境独特, 光学性质复杂, 中上层的环流和众多中小尺度涡旋, 使得整个海域 POC 时间空间变化很大, 同时由于季风与黑潮的推动, 表层流系转换较快, 海洋初级生产力季节变化明显。因此, 亟需开展适用于我国南海海区 POC 浓度反演的海色卫星遥感算法研究。此类创新性监测手段的建立, 将能实现对区域海洋生态系统 POC 分布提供从数小时到数十年多种时间尺度的有效观测, 从而使得在大空间尺度上研究气候变化对碳循环的影响成为可能。遥感反演的 POC 也能为有机碳输出通量的模型估算提供边界约束。结合现有的 chl-a 遥感技术能得到海表的 POC:chl-a 比值, 将为深入研究自养生物、异养生物以及有机碎屑等对 POC 的贡献比例, 光合作用生长生理, 生物有机碳输出的关键过程提供重要的科学依据。

1.2 研究现状

过去 30 年来, 利用卫星遥感评估浮游植物生物量和初级生产力是研究的重点和热点, 受此兴趣驱动, 海色遥感的主要工作也相应地集中于海表 chl-a 的反演。这一时期生物光学领域研究最多的就是 chl-a 与遥感反射比(remote sensing reflectance, R_{rs})的关系。在大量现场实测数据的基础上, NASA 建立了 chl-a 的卫

星遥感经验算法[O'Reilly et al., 1998, 2000]。目前, chl-a 浓度已成为国际上所有海色卫星的标准产品之一, 其他主要的光辐射测量(radiometry)标准产品包括: 归一化离水辐亮度(normalized water-leaving radiance, nL_w), 蓝光(490nm)漫射衰减系数(diffuse attenuation coefficient, K_{490})等。

1980 年代后期才开始出现有关海水光学特性与 POC 相关性的研究。[Morel, 1988]通过分析大量实测数据, 分别得到 chl-a 与 550nm 下的散射系数 $b(550)$ 的相关性, 以及 POC 与 chl-a 之间的相关性, 进而发现 $b(550)$ 与 POC 之间存在几乎线性的正相关。同时他还发现, 虽然 POC 与 chl-a 基本呈正相关, 但是对于任一 chl-a 值, POC:chl-a 比值都有高达几倍的差异。这样以 chl-a 转化成 POC 的准确度就不恒定。因此, 最可靠的方法还是要同时进行 POC 测定和光学测量来直接建立这些参数的相互关系。

最初的工作是研究红光(660nm)下颗粒物质的光束衰减系数(Beam Attenuation Coefficient, c), 即 $c_p(660)$ 用于估算 POC[Bishop, 1999; Mishonov et al., 2003]。近 20 年来, $c_p(660)$ 已经成为与 POC 浓度密切相关的光学参数中实测数据最多的一个。针对这两者间关系实测结果的报道, 起先出现在北大西洋[Gardner et al., 1993]和南大洋[Villafane et al., 1993]的研究。在此之后相关的现场观测在全球各大洋相继展开[Marra et al., 1995; Gundersen et al., 1998; Loisel & Morel, 1998; Bishop et al., 1999; Claustre et al., 1999; Gardner et al., 2000; Stramska & Stramski, 2005]。[Gardner et al., 2006]对全球多处海域的 POC 和 $c_p(660)$ 数据进行了集成和总结, 结果发现, 虽然两者在各个区域均呈较好的线性正相关, 但是其经验关系式的斜率以及统计相关系数均存在较大的差异。此外, 由光辐射测量参数不易通过逆向模型(inverse model)得到 $c_p(660)$ 。这类现场数据虽然海量, 但是对 POC 的卫星遥感算法助益有限。近年来, 由 AOPs 反演 IOPs 进而得到生物地球化学变量的生物光学逆问题(inverse problem of bio-optics)研究有较大进展, 出现一些半解析算法, 如 GSM 算法[Maritorena et al., 2002], QAA 算法[Lee et al., 2002]等, 利用海色卫星光谱数据提取后向散射系数(backscattering coefficients, b_b)的研究日渐增多, 因此一些研究者也尝试通过实测 b_b 来估算 POC [Boss et al., 2004; Loisel et al., 2007]。

最近, 该领域的一个新方向是根据船测数据直接关联 POC 与 R_{rs} 来建立适用

于海色卫星遥感的生物光学算法。[Stramski et al., 1999]率先用两步经验回归的方法实现遥感对南大洋 POC 的估测。他们首先取得 POC 与现场实测颗粒贡献的 b_b (b_{bp})的经验关系, 第二步的关系式则关联 R_{rs} 和 b_b , 这一算法只使用了 550nm 单一波长的 $R_{rs}(550)$ 。[Pabi & Arrigo, 2006]研究了罗斯海和南极锋面区 $R_{rs}(555)$ 与 POC 的相互关系, 发展了分别针对这两片海域的区域算法。近来, 利用 R_{rs} 蓝绿通道的比值(例如, $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$ 或者 $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$)的海色算法逐渐受到重视[Stramska & Stramski, 2005; Stramski et al., 2008]。这一思路受到了 chl-a 海色算法的启发。因为可见光传感器的 555nm 通道处于绿光谱段, 浮游植物的吸收特性对 R_{rs} 的影响很小; 同时, 利用这一通道的 R_{rs} 将光谱参量归一化, 也减少了光谱测量本身不确定性对遥感算法的影响。

综上所述, 可以总结出常用的 POC 反演算法有:

1. IOPs→POC, 最初的红光衰减系数算法。
2. AOPs→POC, 包括单通道遥感反射比法和双通道遥感反射比值法。
3. AOPs→IOPs→POC, 称之为两步算法。又可具体分为:
 - 1) 双通道遥感反射比与衰减系数法, 即 $R_{rs}(\lambda)/R_{rs}(555) \rightarrow c_p(660) \rightarrow \text{POC}$;
 - 2) 单通道遥感反射比与后向散射系数法, 即 $R_{rs}(555) \rightarrow b_b(555) \rightarrow \text{POC}$;
 - 3) 半分析算法, 即 QAA/GSM $\rightarrow b_b(555) \rightarrow \text{POC}$ 。
4. 海色遥感标准产品法。是将 POC 同标准海色产品, 如 chl-a、 K_d490 、 $nL_w(555)$, 进行统计分析, 相关研究有[Mishonov & Gardner, 2003], [Mishonov & Richardson, 2008]等。

1.3 研究目标及内容

本文依据 2011 年夏季南海实测 POC 和光学数据, 探索建立适用于南海的 POC 海色卫星遥感反演算法, 为区域碳的生物地球化学循环提供新的研究方法和监测技术手段。将建立的遥感算法应用到海色卫星 SeaWiFS 遥感反射比数据, 得到南海月平均 POC, 并结合海表面高度、风场、温度遥感数据, 分析南海 POC 在季节和年际时间尺度上的时空变化特征。

主要研究内容分为三部分:

- 1) 南海 POC 遥感算法的建立。利用海上实测数据对不同遥感算法进行真实

性检验,分析实测结果与遥感反演结果的误差,确定适用于南海实际观测需求的 POC 海色卫星遥感算法。

2) 南海 POC 的季节分布特征。将上述算法应用到 SeaWifs 遥感反射比数据,得到南海 POC 月平均数据。选择夏季上升流南海北部陆架区、河口输入影响的珠江口、冬季浮游植物藻华吕宋岛西北测、中央海盆 4 个典型区域,分析不同区域 POC 的季节变化特征及其风场、海表面高度对其影响。

3) 南海 POC 年际变化特征。选择海洋环境相对稳定的中央海盆区域,分析 POC 异常同风速异常、海表面高度异常及 ENSO 指数的关系,分析 POC 在 El-Nino 和 La-Nina 不同条件下的响应。

1.4 论文框架

此篇论文由五部分组成,各章内容简述如下:

第一章为绪论。介绍选题背景、研究意义以及研究现状,目标和内容。

第二章为数据与方法。介绍了南海背景情况,航次调查 POC 和光学数据的测量及校正方法,介绍了海色遥感反射比、风速、温度、海表面高度卫星遥感数据和 ENSO 指数的来源及分辨率情况。

第三章为南海 POC 遥感算法建立。探讨单通道,双通道比值,两步反演算法反演 POC 的性能,得出最适合南海的遥感算法。

第四章为南海 POC 时空分布特征。选择南海北部陆架区、珠江口、吕宋岛西北部、中央海盆 4 处典型海区,分析 POC 的季节分布特征,并分析其可能的动力机制。以中央海盆区域为例,分析南海 POC 年际变化特征,在 El-Nino 和 La-Nina 不同情况下的响应。

第五章为总结与展望,总结本论文的主要结论并提出尚未解决的科学问题以及继续研究的方向,以便未来进一步的研究与探讨。

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.